مطالعهٔ آزمایشگاهی حداکثر عمق آب‌شستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد در پایین‌دست سدهای مخزنی*

سمیرا منصوری [۱] صمد امام قلی زاده [۲] خلیل اژدری[۳] روزبه موذن زاده [٤]

چکیده در مقالهٔ حاضر نتایج یک مطالعهٔ آزمایشگاهی درزمینهٔ تعیین ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی حاصل از جت‌های ریزشی افقی آزاد در پایین‌دست دریچه‌های سدهای مخزنی ارائه شده‌است. هندسه حفرهٔ آب‌شستگی به بسیاری از پارامترها مانند دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها (Q_j)، قطر متوسط رسوبات بستر پایین‌دست (D_{50}) و زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی در صفحهٔ افقی (θ) بستگی دارد. در این مطالعه اثر این پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور اثر پارامترهای دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها (Q_j)، قطر متوسط رسوبات بستر پایین‌دست (D_{50}) و زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی در صفحهٔ افقی (θ) مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. جت آب از لوله‌هایی با مقاطع دایره‌ای به‌قطر ۱/۲۵ اینچ از ارتفاع ثابت ۹۵ سانتی‌متر برروی بستر رسوبات پایین‌دست ریزش می‌نمود. کف حوضچهٔ پایین‌دست با سه نوع رسوب غیرچسبندهٔ یکنواخت با قطر متوسط معادل ۱/۷، ۳/۲ و ٦/۷۵ میلی‌متر تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر پوشانده شد. آزمایش‌ها با دبی‌های متفاوت در محدودهٔ ۱/۳۲ تا ٥/١٤ لیتر بر ثانیه انجام گرفت. نتایج پژوهش نشان می‌دهد در تمامی آزمایش‌های انجام‌شده حفرهٔ آب‌شستگی در پایین‌دست مخزن تشکیل شده و با افزایش دبی، مقدار عمق آب‌شستگی (d_s) افزایش یافته‌است. آنالیز حساسیت صورت‌گرفته بر رابطهٔ عمومی معرفی‌شده در این پژوهش حاکی از آن است که اعمال ۲۰ ± درصد تغییر در پارامترهای دبی جت، قطر متوسط رسوبات بستر و زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی در صفحهٔ افقی درمجموع عمق نسبی آب‌شستگی ($\frac{d_s}{h_{tw}}$) را به‌ترتیب ۱۲/۳۳، ٦/۲۳ و ۳٤/۰۳ درصد تحت تأثیر قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی جت‌های ریزشی افقی آزاد، دبی جت، زاویهٔ برخورد جت‌ها، حفرهٔ آب‌شستگی.

Experimental Study of the Maximum Scour Depth Due to Free-Falling Jets at the Downstream of Storage Reservoir

S. Mansouri S. Emamgholizadeh Kh. Ajdary R. Moazenzadeh

Abstract *In this study the experimental study an performed to determine the scour hole dimensions due to falling jets at the downstream of storage reservoir. The geometry of the scour hole depends on many parameters such as outflow discharge of gates (Q_j), medium diameter of sediment (D_{50}) and the confluence angle of jets at horizontal plane (θ). In this study, the effect of these parameters were investigated. Water jet falls from pipes with circular section and diameter of 1.25 inch into the downstream pound. The drop height was 95 cm. The downstream pound filled with 20 cm of non-cohesive sediments with medium diameters of 1.7 mm, 3.2 mm and 6.75 mm. Experiments were carried out with different discharges at the range of 1.32 to 5.14 l/s. The results of this study show that for all experiments, a scour hole created at the downstream of the reservoir and with increasing discharge the scour depth (d_s) increased. The sensitive analysis of the proposed general equation showed that when jet discharge, sediment diameter and the confluence angle of jets at horizontal plane (θ) changed $\pm$20%, the relative scour depth (d_s / h_{tw}) changed 12.33, 6.23 and 34.03 %, respectively.*

Key Words Free- Falling Jets, Jet Discharge, Impinging Angle of Jets, Scour Hole.

---

* تاریخ دریافت مقاله۹۵/۸/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۹/۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Email: s_gholizadeh517@Shahroodut.ac.ir

(۳) دانشیار، گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

(٤) استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود

مقدمه

برای تخلیهٔه سیلاب از کنار و یا از روی سدها، روش‌های متعددی وجود دارد. یک روش آن است که جریان به‌صورت آزاد در هوا رها شود. این هدف با احداث سرریزهای آزاد آبشاری مستقر در تراز نزدیک به تاج سد، یا سرریزهای تنداب منتهی به جام پرتاب‌کننده، یا با سرریزهای روزنه‌ای و یا دریچه‌های مستقر در ترازهای پایین سد حاصل می‌شود. در این حالت، جریان آب به‌صورت یک جت آزاد پرانرژی ریزش می‌کند و درنهایت به محلی در پایین‌دست سد برخورد می‌نماید که موجب حرکت مواد بستر و ایجاد حفرهٔ آب‌شستگی می‌گردد و درنهایت ممکن است منجر به شکست سد شود. در این‌جا مسئلهٔ اصلی آن است که جریان سیلاب به‌نحوی تخلیه گردد که آب‌شستگی در پایین‌دست سازه رخ ندهد و یا میزان آن محدود باشد [۱]. ازآن‌جایی‌که حفاظت کامل بستر پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی خصوصاً سدها درمقابل این پدیده بسیار گران تمام می‌شود و از طرفی با صرف هزینه‌های بسیار زیاد نیز امکان حفاظت کامل وجود ندارد؛ لازم است با مطالعات آزمایشگاهی روی مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی، به شناسایی عوامل مختلف مؤثر بر این پدیده پرداخت [۲]. آب‌شستگی متأثر از متغیرهای بسیاری از قبیل پارامتر‌های جریان، مشخصات بستر، زمان و هندسهٔ سازه است؛ به‌همین دلیل محققان، اثر پارامترهای مذکور را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. درنهایت روابط تجربی بسیاری برای پارامترهای مختلف آب‌شستگی از قبیل حداکثر عمق حفره در حالت تعادل، ارائه شده‌است. این روابط نتایج بسیار متفاوتی را به‌ازای شرایط یکسان جریان نشان می‌دهند. این‌گونه تضادها در بحث آب‌شستگی در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی، لزوم انجام تحقیقات بیشتر برای افزایش دانش و آگاهی موجود درراستای برنامه‌ریزی مناسب و کاهش خسارات ناشی از آب‌شستگی را ضروری می‌سازد. بررسی منابع نشان می‌دهد مسئلهٔ آب‌شستگی در پایین‌دست سازه‌ها موردتوجه محققان بوده‌است. برای مثال پاکیلارا و همکاران [3] به بررسی آب‌شستگی ناشی از جت مایل در حوضچهٔ مستغرق پرداختند. هم‌چنین پاکیلارا و همکاران [4] تأثیر دو جت متقاطع را در کاهش آب‌شستگی در حوضچهٔ آرامش مورد بررسی قرار دادند. اکزی و لیم [5] مطالعاتی را به‌منظور بررسی تأثیر جت ریزشی در ایجاد آب‌شستگی در پایین‌دست دریچهٔ کشویی انجام دادند.

هم‌چنین درخصوص یافتن رابطه‌ای برای تخمین عمق آب‌شستگی در پایین‌دست آبشار، شوکلیچ یکی از اولین کسانی بود که مطالعاتی را در این زمینه انجام داد و رابطهٔ زیر را برمبنای داده‌های آزمایشگاهی پیشنهاد کرد [6]:

$$d_s = 4.75\frac{H^{0.2}q^{0.5}}{{D_{90}}^{0.30}} - d_2 \qquad (۱)$$

که در آن d_s حداکثر عمق حفرهٔ آب‌شستگی (متر)، H فاصلهٔ عمودی بین خط انرژی بالادست و سطح آب پایین‌دست (متر)، q دبی در واحد عرض (مترمکعب در ثانیه در متر) و D_{90} اندازهٔ مصالح رسوبی بستر رودخانه است که ۹۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر می‌باشند (متر) و d_2 عمق آب پایین‌دست (متر) است. جانسون مطالعاتی روی جت‌های عمودی انجام داد. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که اگر جتی با قطر ٤٠ میلی‌متر به ۳۲ جت تقسیم گردد منتهی مساحت آن تغییر نکند، تفاوت معنی‌داری در عمق آب‌شستگی ایجاد نمی‌کند، درحالی‌که اگر به جتی با قطر ٤٠ میلی‌متر ٥٠ درصد هوا مخلوط شود به‌طوری‌که سرعت و دبی جریان تغییر نکند، حداکثر عمق آب‌شستگی به‌شدت کاهش می‌یابد [7]. میسون به مطالعاتی درزمینهٔ آب‌شستگی ناشی از جت‌های ریزشی پرداخت. براساس مطالعات وی روابطی که از شدت جریان، ارتفاع ریزش و اندازهٔ ذرات در پیش‌بینی حداکثر عمق آب‌شستگی استفاده می‌کنند، به‌قدر کافی دقت دارند و وارد کردن پارامترهای دیگر، پیش‌بینی‌ها را در حد قابل قبولی بهبود نمی‌بخشد[8].

آزمایش‌های انجام‌شده توسط سعیدی‌نژاد نشان

می‌دهد که دبی جریان یا سرعت جت آب خروجی مهم‌ترین عامل در آب‌شستگی پایین‌دست سرریز است؛ به‌طوری‌که با افزایش سرعت جت، پتانسیل حمل رسوب افزایش‌یافته و درنتیجه ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی گسترش پیدا می‌کند. هم‌چنین طول و عرض حفرهٔ آب‌شستگی با عدد فرود رابطهٔ مناسب دارد درصورتی‌که عمق حفره با نسبت سرعت جریان به سرعت برشی بحرانی ارتباط بهتری دارد [۹]. آذر اثر دانه‌بندی مصالح بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد را مورد بررسی قرار داد. او در مطالعات خود رابطهٔ بدون بعدی ارائه کرد که هم برای مصالح یکنواخت پایین‌دست و هم مصالح غیریکنواخت کاربرد دارد. درنهایت، با تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده در آزمایشگاه، رابطهٔ جدیدی برای تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی ارائه داد [۲]. مهرآیین و قدسیان به بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی موضعی ناشی از جت‌های مایل پرداختند. نتایج نشان داد ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی، در جت‌های مایل کمتر از جت‌های افقی است. درنهایت به این نتیجه رسیدند که از جت‌های مایل می‌توان به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی استفاده کرد [۱۰].

فرهودی [11] در بررسی آب‌شستگی پایین‌دست دریچهٔ کشویی به این نتیجه دست یافت که حجم رسوبات جابه‌جاشده به‌میزان دبی جریان حساس است که منجر به عمق آب پایین‌دستِ متغیری می‌شود. ترمینی [6] آب‌شستگی بستر پایین‌دست دریچهٔ کشویی را تحت شرایط جریان پایدار مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که حفرهٔ آب‌شستگی در ۳٤ درصد اول طول مخزن رسوبات رخ می‌دهد. اکبری و همکاران [۱۲] به مطالعهٔ آزمایشگاهی تأثیر تغییرات دبی و عمق پایاب بر آب‌شستگی حاصل از جت خروجی از پرتاب‌کنندهٔ جامی‌شکل پرداختند و درنهایت رابطهٔ زیر را برای بیشترین عمق آب‌شستگی ارائه دادند (اکبری و همکاران، ۱۳۹۰):

$$\frac{D}{h_t} = 5.36(Fr)^{0.99} \qquad (۲)$$

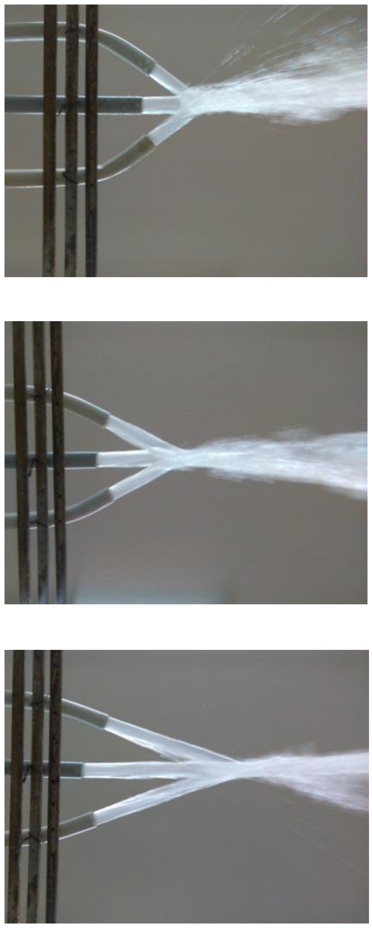
که در این رابطه Fr عدد فرود، D بیشترین عمق آب‌شستگی و h_t عمق پایاب است. کلانتری و بازرگان نیز با به‌کارگیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی جمع‌آوری‌شده، رابطهٔ بی‌بعدی را برای تخمین میزان آب‌شستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد پایین‌دست سرریز پرتابی ارائه دادند. این رابطه می‌تواند در طراحی اولیهٔ این‌گونه سرریزها برای تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست توصیه شود [۱۳]. درمجموع بررسی منابع نشان می‌دهد، هنوز به‌طور خاص تحقیقی در ارتباط با جت‌های ریزشی افقی در پایین‌دست سدهای مخزنی انجام نشده‌است. بنابراین در تحقیق حاضر بااستفاده از ساخت مدل فیزیکی به بررسی این پدیده پرداخته شد و هم‌چنین تأثیر پارامترهای مؤثر در ایجاد حفرهٔ آب‌شستگی مانند تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر حداکثر عمق آب‌شستگی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر مدل آزمایشگاهی دریچه برای بررسی پدیدهٔ آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سدهای مخزنی طراحی شده‌است. آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی شاهرود، در یک فلوم مستطیلی‌شکل با عرض ۱ متر، طول ۲/٤۳ متر و ارتفاع (فاصلهٔ کف حوضچهٔ رسوب تا سطح زمین) ۱/۱۱ متر انجام شد؛ به‌طوری‌که آب‌شستگی درون آن تحت تأثیر دیواره‌های کناری قرار نمی‌گرفت. دیواره‌های فلوم از جنس پلاکسی‌گلاس شفاف بود که امکان مشاهدهٔ تغییرات آب‌شستگی را فراهم می‌ساخت و کف آن از فلز (ورق گالوانیزه) با شیب صفر ساخته شده بود.

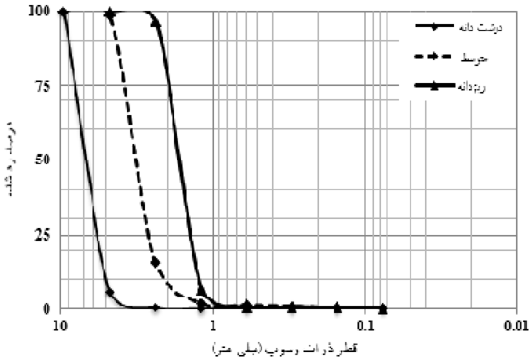
برای ساخت مدل، از سه لوله با مقاطع دایره‌ای به‌قطر ۱/۲۵ اینچ از جنس نیوپایپ به‌عنوان دریچه‌های سد استفاده شد. به‌منظور بررسی تأثیر زاویهٔ استقرار دریچه‌ها بر میزان آب‌شستگی، لوله‌ها در سه حالت با

سه زاویهٔ ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درجه (نسبت به صفحهٔ افق) به فاصلهٔ ۱۰ سانتی‌متر از هم در ابتدای فلوم نصب و به‌طور کامل آب‌بندی گردید. شکل (۱) نمایی از برخورد جت‌های ریزشی افقی را در سه زاویهٔ مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱ برخورد جت‌های ریزشی افقی با سه زاویهٔ ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درجه نسبت به صفحهٔ افق (به‌ترتیب از راست به چپ)

سپس بستر پایین‌دست دریچه‌ها به‌ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از سه نوع رسوب غیرچسبنده با قطر متوسط ذرات (D_{50}) معادل با ۱/۷، ۳/۲ و ٦/۷۵ میلی‌متر و به‌ترتیب انحراف معیار هندسی ($\sigma_g = \sqrt{D_{84}/D_{16}}$) برابر با ۱/۲۹، ۱/۳ و ۱/۲۸ پوشانده شد؛ که منحنی دانه‌بندی مربوط به هر یک در شکل (۲) ارائه شده‌است.



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی رسوبات مورداستفاده در آزمایش‌ها

یک واحد توری سنگ نیز در انتهای فلوم هم‌سطح با ذرات رسوب بستر (با دانه‌بندی مختلف) برای جلوگیری از شسته شدن رسوبات درنظر گرفته شد. قبل از انجام هر آزمایش سطح بستر بااستفاده از مالهٔ چوبی و تراز کاملاً مسطح شد و برای ایجاد تراکمی یکنواخت، به‌منظور حصول اطمینان از شرایط یکسان و عدم وقوع تغییرات موضعی غیرقابل‌پیش‌بینی، با الوار کوبیده شد. سپس نقاط مختلف بستر به‌صورت تصادفی بااستفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای (با دقت ۰/۱ میلی‌متر)، تراز و یک صفحهٔ مسطح کنترل گردید تا خطای چشمی در آزمایش‌ها دخالت نداشته و تمام سطح بستر صاف و یک‌دست باشد. بعد از تراز کردن سطح بستر، بازهٔ رسوبی به‌وسیلهٔ یک ورق از جنس پلی‌اتیلن کاملاً پوشانده شد؛ به‌طوری‌که آب بدون برخورد با بستر، به انتهای حوضچهٔ رسوب هدایت می‌شد. این امر باعث می‌شد که شرایط نامناسب قبل از شروع هر آزمایش (دبی و زاویهٔ نامطلوب) تأثیری بر نتایج به‌دست‌آمده نداشته باشد.

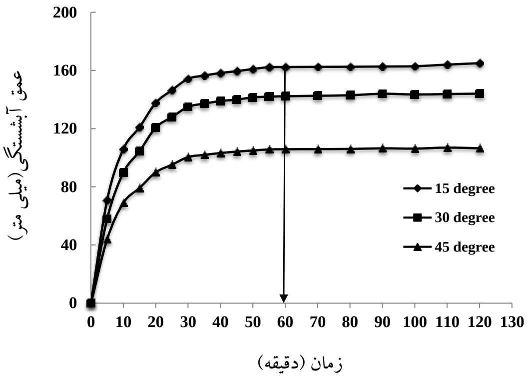
درادامه الکتروپمپ روشن شد و با باز شدن تدریجی شیر ورودی، جریان آب به‌آرامی از طریق لوله‌ای به‌قطر ۲/۵ اینچ از مخزن وارد دریچه‌ها (به‌قطر ۱/۲۵ اینچ) شد و از آنجا به داخل فلوم جریان یافت. سپس دبی افزایش یافت تا دبی موردنظر حاصل شود. پس از تنظیم دبی و دست‌یابی به‌مقدار موردنظر، در یک لحظه پوشش پلی‌اتیلن از روی بستر برداشته شد و زمان صفر

درج گردید. خاتمهٔ آزمایش زمانی بود که ذرات رسوبی بستر به پایین‌دست منتقل نشدند و حفرهٔ آب‌شستگی به‌حالت تعادل رسید. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری دبی جریان به‌روش حجمی صورت گرفت؛ بدین‌صورت که جریان خروجی از دریچه‌ها وارد ظرفی با حجم مشخص شد و با ثبت مدت زمانی که ظرف پر می‌شد، مقدار دبی از حجم ظرف به زمان محاسبه گردید.

آزمایش‌ها به‌ازای ارتفاع ریزش (فاصله از وسط مقطع لوله تا سطح بستر) ثابت برابر ۹۵ سانتی‌متر و دبی‌های متفاوت ۱/۳۲، ۲/۰۶، ۲/۸۵، ۴/۰۰، ۴/۷۴ و ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه صورت گرفت. درنهایت پروفیل آب‌شستگی به‌صورت شبکهٔ ۵×۵ سانتی‌متر برداشت شد. این کار توسط عمق‌سنج نقطه‌ای (با دقت ۰/۱ میلی‌متر) که به‌طور دستی درراستای محور طولی و عرضی بستر حرکت می‌کرد و امکان خواندن هر سه مختصات نقطهٔ موردنظر را فراهم می‌ساخت، صورت گرفت. باتوجه به داده‌های برداشت‌شده، ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی از قبیل طول، عرض و حداکثر عمق آب‌شستگی و نیز ارتفاع برآمدگی رسوبات در پایین‌دست حفره استخراج گردید تا روند آب‌شستگی مشخص گردد.

بنابراین برای برر سی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی، پنجاه و چهار آزمایش با به‌کارگیری شرایط مختلف شامل شش دبی، سه دانه‌بندی و سه زاویه برای برخورد جت‌های ریزشی افقی انجام شد. پس از انجام آزمایش ها، داده های مربوط به آب شستگی مانند طول و عمق آب شستگی اندازه‌گیری شد و هم‌چنین به‌کمک نرم‌افزار Surfer حجم آب‌شستگی محاسبه گردید.

در پژوهش حاضر به‌منظور تعیین مدت زمان آزمایش، سه آزمایش ۱ ساعته برای بحرانی‌ترین شرایط (رسوبات ریزدانه و بیشترین سرعت جت) در هر زاویه انجام پذیرفت. ابعاد آب‌شستگی به‌صورت مرتب بردا شت شد و درنهایت شکل پیشرفت حداکثر عمق آب‌شستگی با زمان ترسیم گردید. همان‌طوری‌که از شکل (۳) مشهود است، در مرحلهٔ اولیه، با برخورد جت آب خروجی از دریچه‌ها به بستر پایین‌دست، آب شستگی به سرعت رخ می‌دهد و شیب آن در این مرحله زیاد است. در مرحلهٔ دوم (مرحلهٔ توسعه) با افزایش قدرت و اندازهٔ گرداب‌های ایجادشده، ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی افزایش می‌یابد و شیب منحنی در این مرحله خیلی کمتر از مرحلهٔ قبل است. در مرحلهٔ سوم (مرحلهٔ تثبیت) نیز تغییرات کاهش می‌یابد و نهایتاً در مرحلهٔ پایانی (مرحلهٔ تعادل) ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی بعد از مدت ۶۰ دقیقه به ۹۰ درصد حالت تعادل یا بالاتر از آن می‌رسد که شیب منحنی در این مرحله نزدیک به صفر است. درنتیجه باتوجه به منحنی ارائه‌شده، زمان ۶۰ دقیقه به‌عنوان زمان اجرای آزمایش‌ها درنظر گرفته شد.



شکل ۳ تغییرات زمانی حداکثر عمق آب‌شستگی برای بحرانی‌ترین شرایط (رسوبات ریزدانه و بیشترین سرعت جت)

برای استخراج رابطهٔ حاکم بر مسئله از آنالیز ابعادی به‌روش باکینگهام (قضیهٔ π)، استفاده گردید. بدین منظور عوامل مؤثر بر آب شستگی تحت اثر جت آب خروجی از دریچه‌ها به‌شرح زیر دسته‌بندی گردید: ***عوامل مربوط به سیال و رسوب.*** لزجت دینامیکی (μ)، جرم مخصوص آب (ρ_w)، جرم مخصوص مستغرق ذرات رسوب ($\rho_s - \rho_w$)، شتاب ثقل (g) و

قطر متوسط رسوبات (D_{50}).

عوامل هیدرولیکی. دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها (Q_j) و عمق پایاب (h_{tw}).

عوامل هندسی. عرض حوضچهٔ رسوب (B)، ارتفاع ریزش جت (h_j)، زاویهٔ برخورد جت های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (θ) و قطر جت (D_j).

پارامتر عمق حفرهٔ آب‌شستگی (d_s) نیز در محاسبات آنالیز ابعادی مؤثر است. باتوجه به متغیرهای ذکرشده، پارامترهای مؤثر بر عمق آب‌شستگی را می‌توان به‌صورت تابع (۳) نمایش داد:

$$f(V_j, B, h_{tw}, h_j, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s-\rho_w, \theta, D_j, d_s) = 0 \quad (۳)$$

با انجام آنالیز ابعادی به‌روش باگینگهام و انتخاب سه متغیر ρ_w، V_j و h_j به‌عنوان متغیرهای تکراری، رابطهٔ (٤) حاصل شد:

$$f = \left(\frac{B}{h_j}, \frac{h_{tw}}{h_j}, \frac{D_{50}}{h_j}, \frac{g\,h_j}{V_j^2}, \frac{\rho_s-\rho_w}{\rho_s}, \frac{\rho_w V_j h_j}{\mu}, \theta, \frac{D_j}{h_j}, \frac{d_s}{h_j}\right) = 0 \quad (٤)$$

باتوجه به این‌که در این تحقیق تمامی آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی و با ارتفاع ریزش ثابت انجام گرفته‌است، لذا نسبت B/h_j (نسبت عرض حوضچهٔ رسوب (B) به ارتفاع ریزش جت (h_j)) از رابطهٔ (٤) حذف شد. هم‌چنین با ترکیب دو پارامتر بدون بعد $\frac{\rho V_j h_j}{\mu}$ و $\frac{D_j}{h_j}$ پارامتر عدد رینولدز ($R_e = \frac{\rho_w V_j h_j}{\mu}$) به‌دست آمد. با ترکیب سه پارامتر بدون بعد $\frac{\rho_s-\rho_w}{\rho_s}$، $\frac{D_{50}}{h_j}$ و $\frac{g\,h_j}{V_j^2}$ پارامتر بدون بعد $F_g = \frac{V_j}{\sqrt{g(G_s-1)D_{50}}}$ به‌دست آمد که به پارامتر عدد فرود ذره معروف است. ازطرفی طبق محاسبات انجام‌شده مقدار عدد رینولدز جریان (R_e) بسیار بالا است و جریان متلاطم (Turbulent Flow) برقرار است؛ پس می‌توان از اثر لزجت (Viscosity) و یا پارامتر بی‌بعد R_e صرف‌نظر کرد. درمجموع با ترکیب پارامترها نهایتاً رابطهٔ (۵) به‌دست می‌آید:

$$\frac{d_s}{h_j} = f\left(\frac{V_j}{\sqrt{g(G_s-1)D_{50}}}, \theta\right) \quad (۵)$$

رابطهٔ (۵) بیانگر این مطلب است که عمق نسبی آب‌شستگی (d_s/h_{tw}) تابعی از عدد فرود ذره (F_g) و زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (θ) می‌باشد.

مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف از معیار و ضریب تغییرات پارامترهای $\frac{d_s}{h_{tw}}$، θ، F_g در جدول (۱) آمده‌است:

جدول ۱ پارامترهای آماری متغیرهای مورداستفاده در رابطهٔ (۵)

پارامتر	حداقل	متوسط	حداکثر	انحراف از معیار	ضریب تغییرات
θ (rad)	٠/٢٦	٠/٥٢	٠/٧٩	٠/٢٢	٤١/٢١
Fg	٤/٩٨	١٨/٧٥	٣٨/٦٦	٩/٦٥	٥١/٤٦
(ds/htw)	٠/٨٠	١/٧٤	٢/٨٥	٠/٥٣	٣٠/٥٣

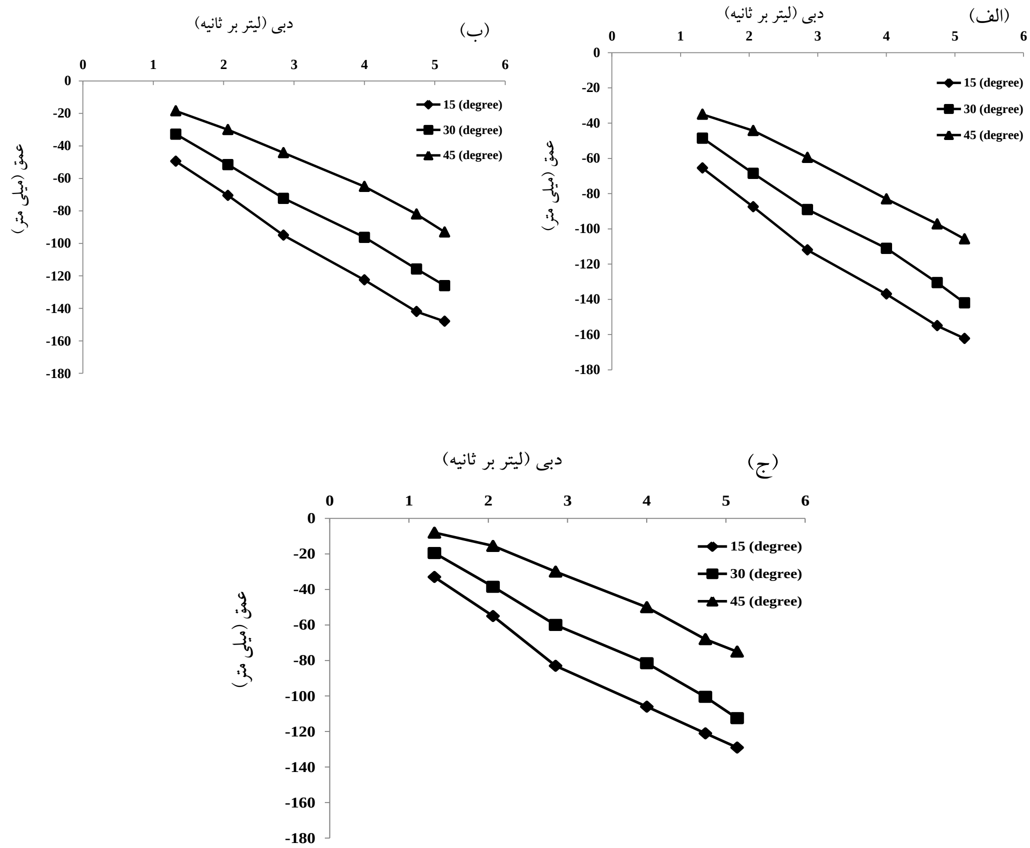
نتایج و بحث

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد فرایند آب‌شستگی اولیه خیلی سریع است. در این حالت جت آب خروجی از دریچه‌ها پس از برخورد با بستر پایین‌دست، مواد فرسایش‌یافته را از ته حفرهٔ آب‌شستگی می‌شوید و همراه خود به‌سمت پایین‌دست انتقال می‌دهد. در این محدوده بخشی از جت به‌همراه مصالح منحرف می‌شود و تقریباً رو به بالا بلند می‌شود و قسمتی از جریان به‌سمت بالادست برمی‌گردد و وارد جریان بالادست می‌شود. رسوبات همراه این جریان به‌صورت معلق داخل حفره باقی می‌مانند. بقیهٔ جریان به‌سمت پایین‌دست منتقل می‌شود و بخشی از مواد فرسایش‌یافتهٔ همراه خود را روی سطح شیب‌دار ته‌نشین می‌کند و همراه بقیهٔ ذرات به‌سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. تراز بستر در محدودهٔ سطح شیب‌دار به‌طور متناوب افزایش می‌یابد و مواد ته-نشین‌شده در این سطح به‌تدریج سرمی‌خورند و به‌داخل حفرهٔ اصلی بازمی‌گردند. پس‌از قطع جریان، هر دو سطح بالادست و پایین‌دست حفره با زاویهٔ قرارگیری مواد بستر (ϕ) به داخل حفره ریزش خواهند کرد.

در این بخش از تحقیق نسبت به ارائهٔ نتایج حاصل از اعمال اثر سه پارامتر دبی جت آب خروجی از دریچه-ها، قطر متوسط رسوبات بستر و زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی افقی آزاد بر ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی اقدام شده‌است.

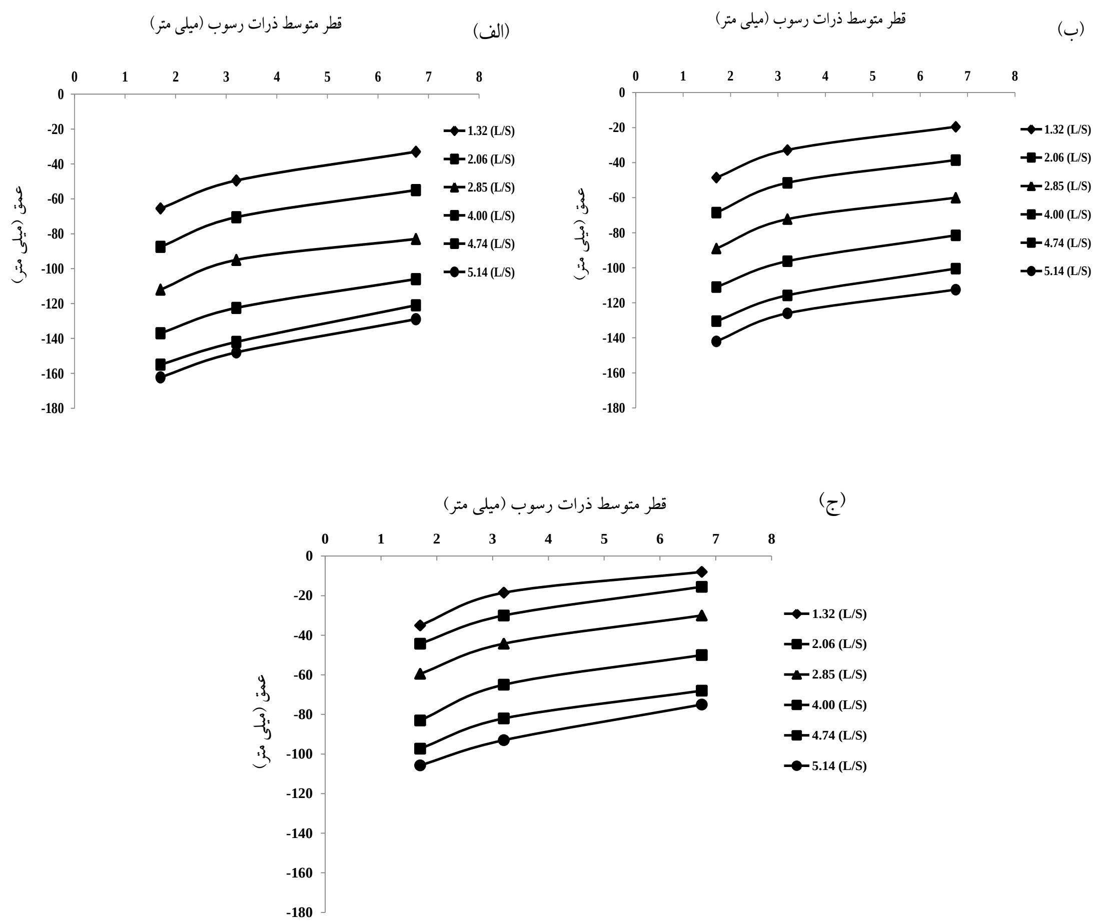
بررسی تأثیر دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در روند انجام این تحقیق، دبی مورداستفاده در آزمایش‌ها بود. شکل (٤) مربوط به تأثیر دبی در روند تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی (d_s) را برای هر یک از رسوبات ریزدانه (D_{50}=۱/۷mm)، متوسط (D_{50}=۳/۲mm) و درشت‌دانه (D_{50}=٦/۷٥mm) به‌ازای زاویه‌های مختلف (θ=۱٥°، ۳۰°، ٤٥°) نسبت به صفحهٔ افق نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در تمامی حالات جریان و در دانه‌بندی‌های مختلف، دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها تأثیر زیادی بر میزان حداکثر عمق آبشستگی بستر پایین‌دست دریچه‌ها دارد؛ به‌طوری‌که در یک دانه‌بندی و زاویهٔ ثابت با افزایش دبی، d_s افزایش می یابد. درواقع افزایش دبی همراه با افزایش انرژی جنبشی جت است که این امر منجر به افزایش پتانسیل حمل رسوب در پایین‌دست دریچه‌ها، افزایش میزان آب‌شستگی موضعی و درنهایت نشست بیشتر بستر پایین‌دست شده‌است.

همان‌طورکه در شکل (٤) مشاهده می‌شود اولاً با افزایش مقدار دبی جت، مقادیر حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. ثانیاً حداقل مقدار آب‌شستگی به‌ازای دبی ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه و در زاویهٔ ٤٥ درجه نسبت به صفحهٔ افق معادل ۸ میلی‌متر و حداکثر آن به‌ازای دبی ٥/١٤ لیتر بر ثانیه و در زاویهٔ ۱٥ درجه (نسبت به صفحهٔ افق) معادل ١٦٢/٢٥ میلی‌متر است. نکتهٔ مهم دیگری که در این شکل وجود دارد این است که در زاویهٔ ۱٥ درجه، درصد کاهش عمق آب‌شستگی با کاهش دبی از ٤/٧٤ به ٤/٠٠ لیتر بر ثانیه کمتر از ٢/٠٦ به ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه استدلال نمود که در دبی ٢/٠٦ لیتر بر ثانیه آب‌شستگی اتفاق افتاده و به یک حد قابل قبول رسیده‌است، اما در دبی ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه هنوز این اتفاق نیفتاده‌است؛ به‌همین‌دلیل اختلاف زیادی بین مقادیر عمق آب‌شستگی دیده می‌شود؛ درحالی‌که در دبی‌های ٤/٠٠ و ٤/٧٤ لیتر بر ثانیه آشفتگی لازم وجود دارد و این اختلاف کمتر است. این روند تقریباً در سایر زاویه‌ها (θ=۳۰°، ٤٥°) نیز برقرار است و نشان‌دهندهٔ این موضوع است که در دبی‌های پایین‌تر، درصد کاهش عمق آب‌شستگی بیشتر است.



شکل ٤ تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی (d_s) به‌ازای دبی‌های مختلف در رسوبات الف) ریزدانه، ب) متوسط و ج) درشت‌دانه

بررسی تأثیر قطر متوسط رسوبات بستر. شکل (٥) به‌ترتیب به بررسی تأثیر تغییر دانه‌بندی بستر در روند تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی (d_s) در هر یک از زوایه‌های ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درجه نسبت به صفحهٔ افق، به‌ازای دبی‌های مختلف (Qj=۱/۳۲، ۲/۰٦، ۲/۸۵، ٤/۰۰، ٤/۷٤، ٥/۱٤Lit/s) می‌پردازد. باتوجه به شکل مذکور ملاحظه می‌شود در هر یک از زوایای ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درجه کمترین مقدار آب‌شستگی در رسوبات با قطر متوسط ٦/۷٥ میلی‌متر و به‌ازای دبی ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه به‌ترتیب معادل ۳۳، ۱۹/٥ و ۸ میلی‌متر است. درمقابل حداکثر مقدار آب‌شستگی در رسوبات با قطر متوسط ۱/۷ میلی‌متر و به‌ازای دبی ٥/۱٤ لیتر بر ثانیه به‌ترتیب معادل ۱٦۲/۲٥، ۱٤۲ و ۱۰٥/۷٥ میلی‌متر است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای تمامی حالات جریان و در زوایای مختلف، افزایش قطر متوسط رسوبات تأثیر معکوس در مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی دارد. به‌طوری‌که با افزایش D_{50} برای دبی‌های مختلف، حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست دریچه‌ها کاهش می‌یابد. درواقع آنچه در نحوهٔ تشکیل حفرهٔ آب‌شستگی مؤثر است قدرت حمل جریان می‌باشد که آن هم تحت تأثیر انرژی جنبشی جت و اندازهٔ ذرات رسوب است. هرچه دانه‌بندی ریزتر باشد به‌دلیل افزایش پتانسیل حمل رسوب، میزان حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. نکتهٔ مهم دیگری که در این شکل وجود دارد این است که با افزایش بیشتر قطر متوسط ذرات رسوب، عمق آب‌شستگی در دبی‌های بالا نسبت به دبی‌های پایین کاهش قابل ملاحظه‌ای نداشته‌است. این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیح کرد که درواقع در شرایطی از جریان، دبی اثر خود را در روند آب‌شستگی از دست می‌دهد یا تأثیر آن کمتر می‌شود.

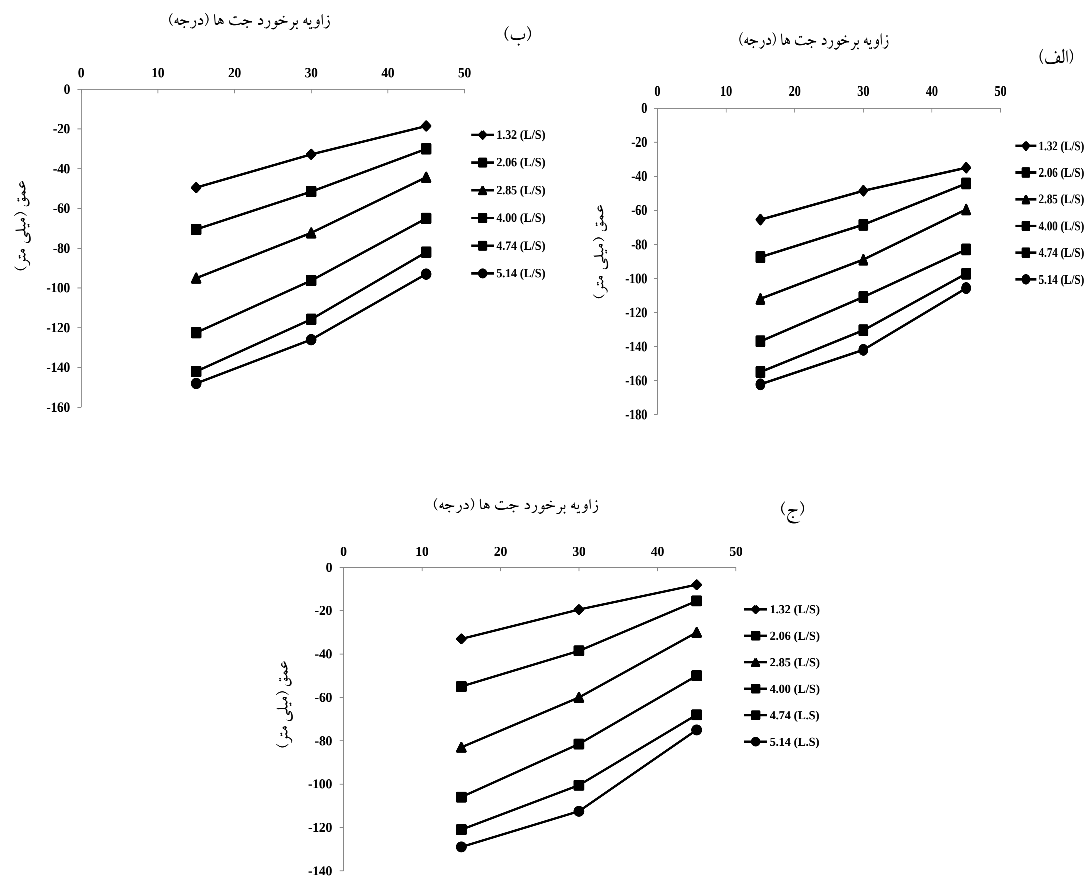


شکل ۵ تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی (d_s) برای دانه‌بندی‌های مختلف: الف) برای زاویهٔ ۱۵ درجه، ب) زاویهٔ ۳۰ درجه و ج) زاویهٔ ۴۵ درجه

بررسی مطالعات انجام‌شده و منابع موجود نشان داد که قرار دادن دریچه‌ها در بدنهٔ سد با ایجاد آشفتگی اولیه در جریان، باعث اتلاف مقداری از انرژی جنبشی جت و درنتیجه کاهش پتانسیل حمل رسوب توسط جریان می‌شود. باتوجه به داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل از این تحقیق نیز می‌توان افزود که مقدار این کاهش پتانسیل با افزایش قطر متوسط رسوبات بستر افزایش می‌یابد.

بررسی تأثیر زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی افقی آزاد نسبت به صفحهٔ افق. پارامتر تأثیرگذار دیگر در روند انجام این تحقیق، زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی افقی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (θ) بود. شکل (٦) به بررسی تأثیر تغییر زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد (θ) در روند تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی (d_s) برای هر یک از دانه‌بندی‌های ۱/۷، ۳/۲ و ٦/٧۵ میلی‌متر به‌ازای دبی‌های مختلف (Qj=۱/۳۲، ۲/۰٦، ۲/۸۵، ٤/۰۰، ٤/٧٤، ۵/۱٤Lit/s) می‌پردازد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر یک از دانه‌بندی‌های ۱/۷، ۳/۲ و ٦/٧۵ میلی‌متر، بیشترین مقدار آب‌شستگی در زاویهٔ ۱۵ درجه و به‌ازای دبی ۵/۱٤ لیتر بر ثانیه به‌ترتیب معادل ۱٦۲/۲۵، ۱٤۸ و ۱۲۹ میلی‌متر است. در مقابل حداقل مقدار آن در زاویهٔ ٤۵ درجه و به‌ازای دبی ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه به‌ترتیب معادل ۳۵، ۱۸/۵ و ۸ میلی‌متر است. نکتهٔ دیگر این است که با افزایش زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد از ۱۵ به ٤۵

درجه نسبت به صفحهٔ افق، مقدار افت d_s شدیدتر از حالتی است که زاویه از ۱۵ به ۳۰ درجه و یا از ۳۰ به ۴۵ درجه افزایش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که ابتدا با نصب دریچه‌ها با زاویهٔ ۱۵ درجه نسبت به صفحهٔ افق، پخش‌شدگی جت‌ها در لحظهٔ برخورد ناچیز است و گرداب‌های شدیدی در پایین‌دست دریچه‌ها ایجاد می‌شود. بنابراین در این شرایط، دریچه‌ها در کاهش انرژی جنبشی جت اثر چندانی از خود نشان نمی‌دهند و مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی زیاد است؛ اما با تغییر زاویهٔ قرارگیری دریچه‌ها به زاویهٔ ۴۵ درجه، بخش زیادی از انرژی جنبشی جت مستهلک می‌شود و کاهش زیادی در مقادیر d_s مشاهده می‌گردد. درنهایت با تحلیل داده‌های مشاهداتی می‌توان گفت تغییرات زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (θ)، روی حداکثر عمق آب‌شستگی (d_s) پایین‌دست دریچه‌ها، تقریباً در تمامی دانه‌بندی‌ها و حالت‌های جریان روند یکسانی را نشان می‌دهد. هرچه دبی جریان کمتر شود، مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی در زاویهٔ موردنظر کاهش می‌یابد. اگر این تغییر با افزایش قطر متوسط رسوبات بستر همراه باشد، مقدار d_s کاهش بیشتری خواهد داشت. هم‌چنین با افزایش θ به‌دلیل تحلیل انرژی جنبشی جت، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در مقدار d_s مشاهده می‌شود.



شکل ٦ تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی ($\mathbf{d_s}$) در زوایای مختلف برخورد جت‌ها برای دانه‌بندی‌های الف) ریزدانه، ب) متوسط و ج) درشت‌دانه

تحلیل گسترش ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی در پایین‌دست سدهای مخزنی. در طراحی دریچه‌ها در بدنهٔ سدهای مخزنی، گسترش طول و عرض حفرهٔ آب‌شستگی نقش مهمی دارد. با دانستن این‌که حفرهٔ آب‌شستگی در چه موقعیتی نسبت به دریچه‌ها گسترش پیدا می‌کند، می‌توان به بررسی موقعیت مناسب استقرار دریچه‌ها باتوجه به توپوگرافی منطقه پرداخت.

پروفیل طولی درواقع یک مقطع برش‌زده از حفره و تل آب‌شستگی درراستای طول فلوم آزمایشگاهی است. لازم به ذکر است که در بعضی حالات به‌علت پخش‌شدگی جت‌ها در لحظهٔ برخورد، الگوی آب‌شستگی متقارن نبوده و بیشینهٔ آب‌شستگی در چپ و راست خط طولی مرکزی اتفاق افتاده‌است.

در شکل (۷–الف) پروفیل‌های طولی تغییرات عمق آب‌شستگی با قرارگیری دریچه‌ها با زاویهٔ ۱۵ درجه نسبت به صفحهٔ افق در رسوبات درشت‌دانه (D_{50}=۶/۷۵mm) و برای تمامی دبی‌های مورداستفاده در آزمایش‌ها رسم شده‌اند. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود به‌ازای تک‌تک دبی‌های به‌کاررفته در آزمایش، ابتدا در پایین‌دست دریچه‌ها یک حفرهٔ آب‌شستگی ایجاد می‌گردد. سپس بخشی از رسوباتِ شسته‌شده، در طول مسیر جریان روی هم انباشته می‌شوند و در پایین‌دست حفره تشکیل پشته رسوبی می‌دهند. در این شکل کمترین مقدار عمق آب‌شستگی برابر ۳۰ میلی‌متر در Q_j=۱/۳۲Lit/s، و بیشترین مقدار آن ۱۱۸ میلی‌متر در Q_j=۵/۱٤Lit/s می‌باشد. هم‌چنین کمترین ارتفاع تپه ۹/۵ میلی‌متر و بیشترین ارتفاع ۵۷ میلی‌متر می‌باشد. نکتهٔ دیگر این است که با افزایش دبی از ۱/۳۲ به ۵/۱٤ لیتر بر ثانیه، سرعت جت خروجی از دریچه‌ها افزایش می‌یابد و فاصلهٔ محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی از انتهای دریچه‌ها حدود ۵۸/۸۲ درصد بیشتر می‌شود.

شکل‌های (۷–ب و ۷–ج) پروفیل‌های رسم‌شده با نرم‌افزار Surfer را نشان می‌دهند که برای کمترین و بیشترین مقدار حفره و تل شکل (۷–الف) رسم شده‌است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود افزایش Q_j از ۱/۳۲ به ۵/۱٤ لیتر بر ثانیه در یک دانه‌بندی و زاویهٔ ثابت (D_{50}=۶/۷۵mm و θ=۱۵°) موجب افزایش عمق حفرهٔ آب‌شستگی (d_s)، افزایش گسترش طولی (L_s) و عرضی حفره (W_s)، و درنهایت افزایش حجم حفره (V_s)، به‌ترتیب به‌میزان ۷٤/۵۸، ۵۸/۳۳، ۲۷/۲۷ و ۹۵/۶۲ درصد می‌گردد. هم‌چنین با افزایش دبی، سرعت برشی جریان در پایاب افزایش می‌یابد که موجب شسته شدن تاج پشته، ته‌نشین شدن ذرات رسوبی در انتهای پشته و درنهایت هموار شدن سطح پشته و افزایش گسترش طولی آن به‌میزان ٦٤/۲۹ درصد می‌شود. نکته‌ای دیگر که در این پروفیل‌ها کاملاً مشخص است، این است که در Q_j=۵/۱٤Lit/s، میزان حفرهٔ آب‌شستگی بسیار عمیق‌تر از پشتهٔ ایجادشده توسط رسوبات است که دلیل آن شسته شدن مقدار زیادی از رسوباتِ پایین‌دست دریچه‌ها می‌باشد.

درنهایت باتوجه به نتایج حاصل از بررسی تأثیر تغییرات پارامتر دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها بر میزان حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست سدهای مخزنی، می‌توان گفت که افزایش دبی جریان در شرایط یکسان، منجر به افزایش ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی (شامل عمق، طول و عرض حفره) و فاصلهٔ محل وقوع حداکثر عمق حفره از انتهای دریچه‌ها می‌گردد.

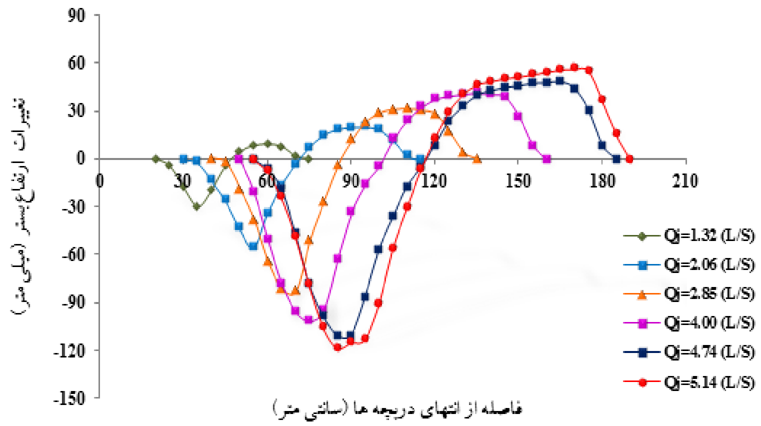
در شکل (۸–الف) پروفیل طولی تغییرات عمق آب‌شستگی در زاویهٔ ۱۵ درجه نسبت به صفحهٔ افق، به‌ازای دبی ۵/۱٤ لیتر بر ثانیه و دانه‌بندی‌های مختلف مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌ازای تک‌تک دانه‌بندی‌های به‌کاررفته در آزمایش، ابتدا حفرهٔ آب‌شستگی و سپس در پایین‌دست آن تپهٔ رسوبی تشکیل شده‌است. در این نمودار کمترین مقدار عمق آب‌شستگی ۱۱۸ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ۱٦۲/۲۵ میلی‌متر است. رسوبات خروجی از چالهٔ آب‌شستگی نیز پشته‌های رسوبی را با ارتفاع‌های ۵۷ میلی‌متر به‌عنوان کمترین و

۸۲/۵ میلی‌متر به‌عنوان بیشترین ارتفاع تشکیل داده‌اند. نکتهٔ دیگر این است که با افزایش قطر متوسط ذرات رسوب بستر از ۱/۷ به ٦/٧٥ میلی‌متر، فاصلهٔ محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی از انتهای دریچه‌ها حدود ٥/٥٦ درصد کاهش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیح کرد که حرکت یک ذره هنگامی آغاز می‌شود که نیروهای اعمال‌شده توسط جریان یعنی نیروی کشسانی و بالابرنده که باعث جدا شدن ذره از بستر می‌شوند، بر نیروی مقاوم ناشی از وزن ذره غالب آید. بنابراین با افزایش اندازهٔ متوسط ذرات رسوب، وزن ذرات افزایش می‌یابد و تنش برشی جریان آب از تنش برشی رسوبات بستر کمتر می‌شود. درنتیجه جدا شدن ذرات از بستر اتفاق نمی‌افتد و محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی به انتهای دریچه‌ها نزدیک‌تر می‌شود.

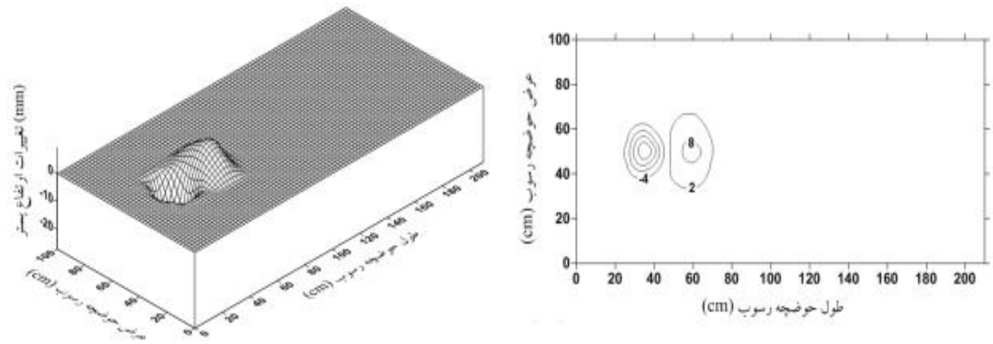
شکل‌های (۸–ب، ۸–ج و ۸–د) پروفیل‌های رسم‌شده با نرم‌افزار Surfer را نشان می‌دهند که برای بیشترین مقدار حفره و تل شکل (۸–الف) رسم شده‌است. مطابق شکل‌های (۸–ب، ۸–ج و ۸–د) با افزایش D_{50} از ۱/۷ به ٦/٧٥ میلی‌متر در یک دبی و زاویهٔ ثابت (Q_j=٥/١٤Lit/s و θ=١٥°)، حداکثر عمق آب‌شستگی حدود ۲۷/۲۷ درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین با کاهش گسترش عرضی حفره، حجم حفرهٔ آب‌شستگی و نیز ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره به‌ترتیب حدود ٥٥/٦٩ و ۳۰/۹۱ درصد کم می‌شود.

شکل (۹–الف) نمایانگر پروفیل طولی آب‌شستگی در رسوبات درشت‌دانه (D_{50}=٦/٧٥mm)، به‌ازای دبی ٥/١٤ لیتر بر ثانیه و زاویه‌های مختلف است. در این شکل کمترین مقدار عمق آب‌شستگی ۷۵ میلی‌متر و بیشترین عمق ۱۱۸ میلی‌متر مشاهده می‌شود. ارتفاع کمترین و بیشترین تپه نیز، به‌ترتیب ۵۷ و ۵۹/۲۵ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین با افزایش زاویهٔ برخورد جت‌ها از ۱۵ به ٤٥ درجه نسبت به صفحهٔ افق، جت آب در فاصلهٔ نزدیک‌تری از دریچه‌ها به بستر برخورد می‌کند. درنهایت مطابق شکل (۹–الف) ابتدای حفره و محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی به‌ترتیب ٥٤/٥٥ و ٤١/١٨ درصد به دریچه‌ها نزدیک می‌شود.

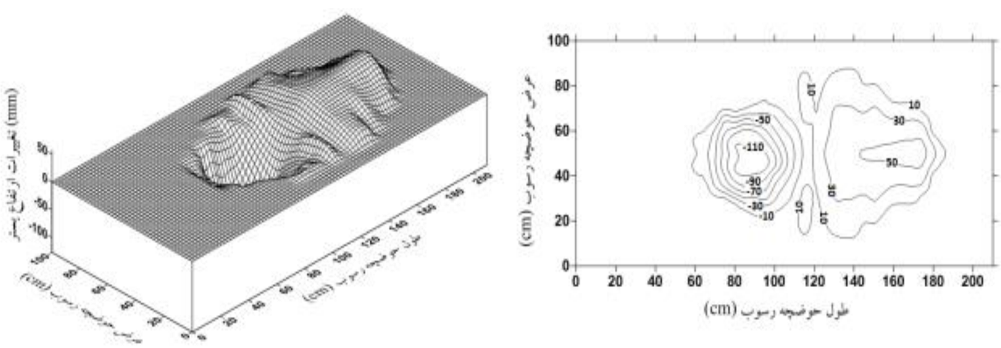
تغییرات پشتهٔ پایین‌دست نیز تحت تأثیر انرژی جنبشی جت برای شستن رسوبات و قدرت حمل جریان برای انتقال رسوبات شسته‌شده به پایین‌دست می‌باشد. هرگونه تغییر در زاویهٔ برخورد جت‌ها که موجب تغییر انرژی جنبشی جت و قدرت حمل جریان می‌شود، تغییرشکل و ارتفاع پشتهٔ پایین‌دست را به‌همراه دارد. در زاویهٔ ۱۵ درجه، قدرت حمل جریان زیاد است و شرایط جریان برروی پشته موجب انتقال ذرات رسوبی شسته‌شده به پایین‌دست پشته و تغییرشکل آنها به‌حالت ذوزنقه‌ای می‌گردد؛ درصورتی‌که با افزایش زاویهٔ برخورد جت‌ها از ۱۵ به ٤٥ درجه نسبت به صفحهٔ افق، قدرت حمل جریان کم می‌شود و این امر منجر به آرام‌تر شدن الگوی آشفتگی جریان در لایه‌های سیال نزدیک به بستر می‌گردد و ذراتی که از جای خود حرکت کرده‌اند، سریع‌تر انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند و بلافاصله بعد از خروج از حفره، در ناحیهٔ برآمدگی به فرم یک قلهٔ نوک‌تیز ته‌نشین می‌شوند. به‌همین دلیل اختلاف بین ارتفاع برآمدگی رسوباتِ پایین‌دست حفره، در زاویه‌های مورد بررسی ناچیز است. شکل‌های (۹–ب، ۹–ج و ۹–د) پروفیل‌های رسم‌شده با نرم‌افزار Surfer را نشان می‌دهند که برای بیشترین مقدار حفره و تل شکل (۹–الف) رسم شده‌اند. با مقایسهٔ پروفیل‌های طولی رسم‌شده در شکل‌های مذکور مشاهده می‌گردد که زاویهٔ برخورد جت‌ها نسبت به صفحهٔ افق، تأثیر زیادی بر میزان حداکثر عمق آب‌شستگی و حجم حفرهٔ ایجادشده دارد. به‌طوری‌که در یک دبی و دانه‌بندی ثابت (Q_j=٥/١٤Lit/s و D_{50}=٦/٧٥mm) با افزایش θ از ۱۵ به ۳۰ درجه و همین‌طور از ۳۰ به ٤٥ درجه انرژی جنبشی جت آب خروجی از دریچه‌ها تحلیل می‌رود و درنهایت d_s به‌ترتیب ۱۳/٥٦ و ٢٦/٤٧ درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین حجم حفرهٔ آب‌شستگی در زاویهٔ ۱۵ درجه ۱۲/۹۵ درصد بیشتر از زاویهٔ ۳۰ درجه و در زاویهٔ ۳۰ درجه ١٦/٣١ درصد بیشتر از زاویهٔ ٤٥ درجه است.



(الف)

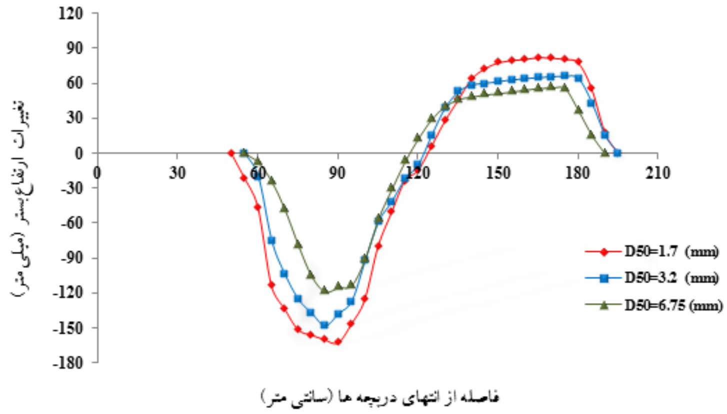


(ب)

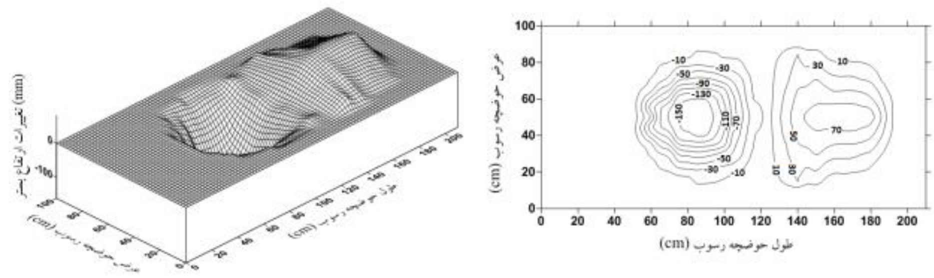


(ج)

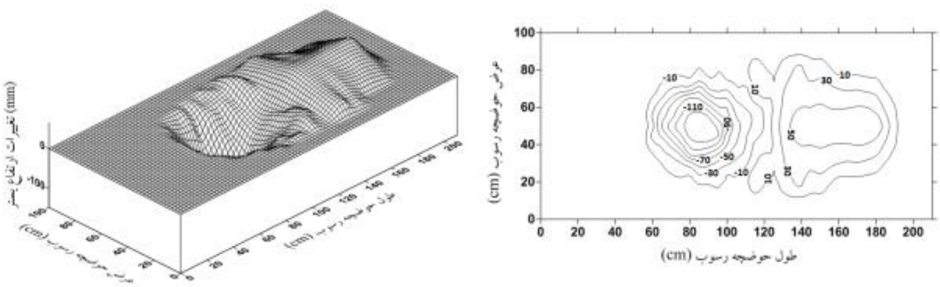
شکل ۷ الف) پروفیل طولی تغییرات میزان آب‌شستگی به‌ازای دبی‌های مختلف در رسوبات درشت‌دانه (٦/٧٥mm)، ب) توپوگرافی کمترین مقدار حفره و تل آب‌شستگی در دبی ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه، ج) توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آب‌شستگی در دبی ٥/١٤ لیتر بر ثانیه



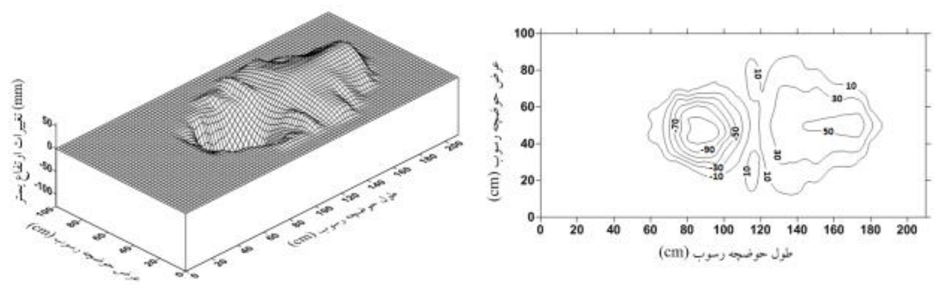
(الف)



(ب)

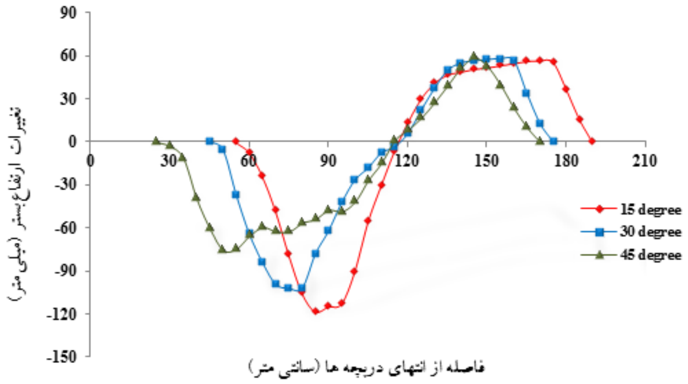


(ج)

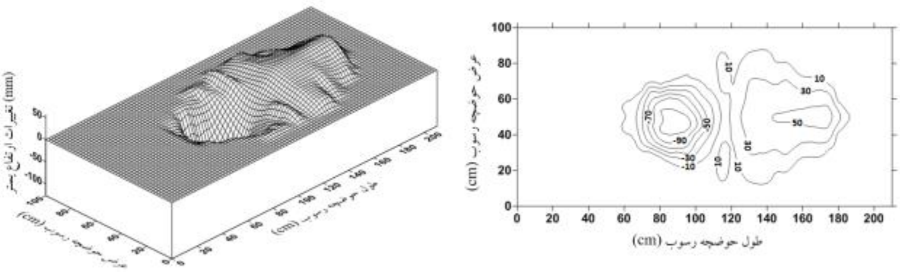


(د)

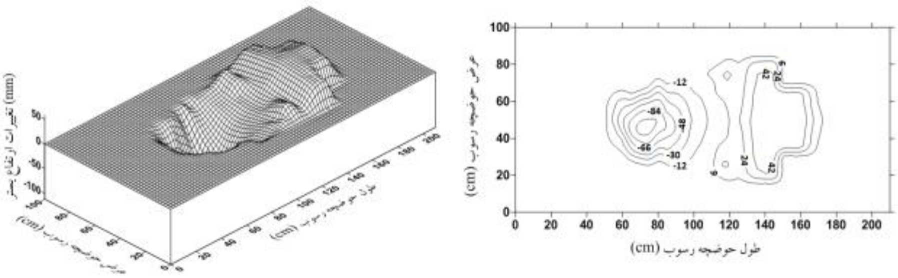
شکل ۸ الف) پروفیل طولی تغییرات میزان آب‌شستگی در دانه‌بندی‌های مختلف به‌ازای دبی ۵/۱٤ لیتر بر ثانیه، ب) توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آب‌شستگی در رسوبات ریزدانه (۱/۷mm)، ج) توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آب‌شستگی در رسوبات متوسط (۳/۲mm)، د) توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آب‌شستگی در رسوبات درشت‌دانه (٦/۷۵mm)



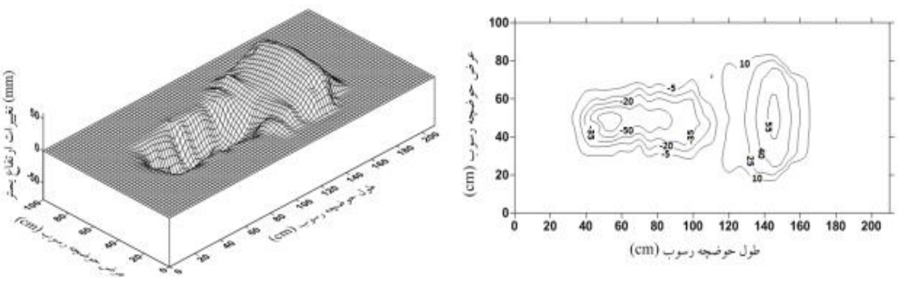
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹ الف) پروفیل طولی آب‌شستگی با قرارگیری دریچه‌ها در زاویه‌های مختلف در دبی ٥/١٤ لیتر بر ثانیه، ب) توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آب‌شستگی در زاویهٔ ۱۵ درجه نسبت‌به صفحهٔ افق، ج) توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آب‌شستگی در زاویهٔ ۳۰ درجه نسبت‌به صفحهٔ افق، د) توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آب‌شستگی در زاویهٔ ٤٥ درجه نسبت به صفحهٔ افق

ارائهٔ رابطه‌ای بی‌بعد برای تعیین حداکثر عمق آب‌شستگی. بااستفاده از آنالیز ابعادیِ انجام‌شده (رابطهٔ ۹)، نرم‌افزار SPSS و آنالیز آماری، چندین معادلهٔ خطی و غیرخطی به داده‌های به‌دست‌آمده برازش داده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد رابطهٔ خطی بهترین برازش را برروی داده‌های آزمایشگاهی دارد که توسط رابطهٔ (٦) نشان داده شده‌است:

$$\frac{d_s}{h_{tw}} = 2.325 + 0.028F_g - 0.037\theta \qquad (٦)$$

که در رابطهٔ (۱۰) d_s حداکثر عمق آب‌شستگی (متر)، h_{tw} عمق پایاب (متر)، F_g عدد فرود ذره ($F_g = V_j/\sqrt{g(G_s-1)D_{50}}$)، V_j سرعت جت آب خروجی از دریچه‌ها (متر بر ثانیه)، g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، G_s چگالی نسبی ($G_s = \rho_s/\rho$)، ρ_s چگالی ذرات بستر و ρ چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، D_{50} قطر متوسط ذرات رسوب بستر پایین‌دست دریچه‌ها (متر) و θ زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (درجه) می‌باشد.

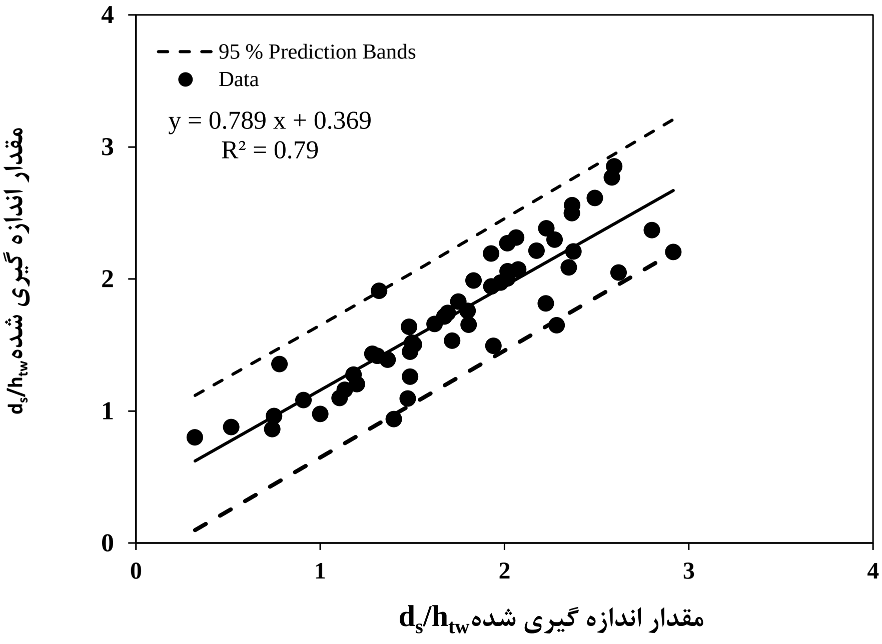
شکل (۱۰) مقادیر d_s/h_{tw} محاسبه‌شده بااستفاده از فرمول (۱۰) را درمقابل مقادیر d_s/h_{tw} اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها نشان می‌دهد.

معیار ارزیابی مدل رگرسیون ضریب تعیین (R^2) (Coefficient of Determination) و جذر میانگین مربعات خطا (Root mean Square Error) (RMSE) می‌باشد. ضریب تعیین برابر با مجذور ضریب هم‌بستگی (Correlation Coefficient) (R) است و لذا:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \qquad (۷)$$

در رابطهٔ (۷) O_i نشانگر پارامتر مشاهده‌شده، P_i پارامتر پیش‌بینی‌شده، $\bar{O}$ متوسط پارامترهای مشاهداتی و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز بیانگر تفاوت میان مقدار پیش‌بینی‌شده تو سط مدل و مقدار واقعی ا ست که باا ستفاده از رابطهٔ (۸) محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \qquad (۸)$$



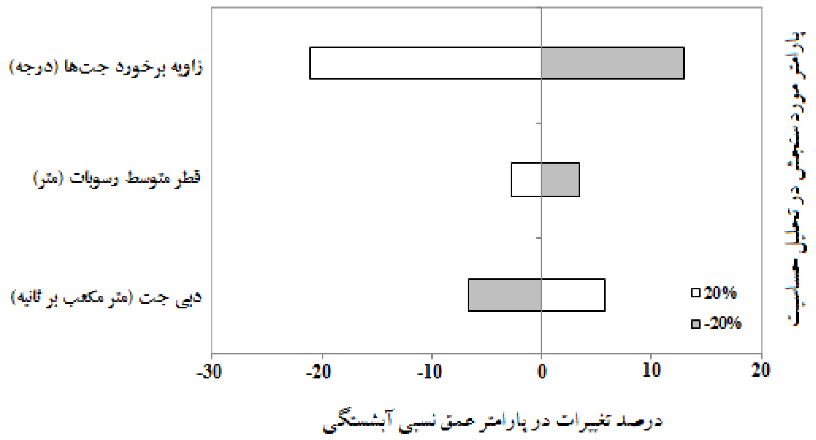
شکل ۱۰ مقادیر $\mathbf{d_s/h_{tw}}$ محاسبه‌شده بااستفاده از رابطهٔ (٦)، درمقابل مقادیر $\mathbf{d_s/h_{tw}}$ اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌ها

درنهایت رابطهٔ (۱۰) به‌ترتیب دارای ضریب تعیین (R^2) و ریشـــهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۰/۷۹ و ۰/۲۷ می‌باشد. همان‌طورکه ملاحظه می شود در معادلهٔ (۱۰) تعداد پارامتر های کمتری برای ارزیابی دخالت دارند، اما با این حال هم‌بســـتگی (R=۰/۸۹) مناسبی بین داده‌ها مشاهده می‌شود و RMSE قابل‌قبولی نیز برای مدل به‌دســـت آمده‌اســـت. هرچه پارامترهای کمتری در مدل مورد بررسی قرار گیرد (درصورتی‌که از دقت مدل کم نشـود)، از لحاظ اقتصـادی به‌صـرفه‌تر، از لحاظ علمی قابل اجراتر و از لحاظ آزمایشـــگاهی نیز خطای کمتری دارد.

تحلیل حساسیت رابطهٔ خطی ارائه‌شده در این تحقیق نسبت به پارامترهای مؤثر در ایجاد حفرهٔ آب‌شستگی.

به‌منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر رابطهٔ عمومی معرفی‌شده در تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست دریچه‌های سدهای مخزنی، نسبت به تحلیل حساسیت رابطهٔ (۱۰) اقدام گردید. بدین منظور ابتدا مقادیر پارامترهای دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها (Q_j)، قطر متوسط رسوبات بستر (D_{50}) و زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (θ)، به‌میزان ±۲۰ درصد نمو داده شد. سپس نتیجهٔ این تغییرات بر عملکرد رابطهٔ (۱۰) در تخمین پارامتر عمق نسبی آب‌شستگی (d_s/h_{tw}) مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۸) نمایانگر تحلیل حساسیت پارامتر d_s/h_{tw} درمقابل پارامترهای Q_j، D_{50} و θ، با اعمال ±۲۰ درصد تغییر می‌باشد.

تحلیل‌ها حاکی از آن است که افزایش ۲۰ درصد در دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها، منجر به رشد ۵/۷۱ درصد در پارامتر d_s/h_{tw} می‌گردد. در نقطهٔ مقابل با کاهش ۲۰ درصد از Q_j، عمق نسبی آب‌شستگی با کاهشی معادل ٦/٦٢ درصد روبه‌رو خواهد بود. در تحلیلی مشابه درخصوص قطر متوسط رسوبات بستر می‌توان چنین بیان نمود که افزایش ۲۰ درصد در D_{50}، منجر به کاهش ۲/۷٦ درصد در پارامتر نسبی d_s/h_{tw} می‌گردد. درحالی‌که با کاهش ۲۰ درصد از D_{50}، عمق نسبی آب‌شستگی با رشدی معادل ۳/٤۷ درصد مواجه خواهد بود. درنهایت کاهش ۲۰ درصد از زاویهٔ برخورد جت‌ها نسبت به صفحهٔ افق، نشان داد که پارامتر d_s/h_{tw} با رشدی معادل ۱۲/۹۳ درصد مواجه است. در نقطهٔ مقابل نیز با افزایش ۲۰ درصدی پارامتر θ، عمق نسبی آب‌شستگی ۲۱/۱۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱ تحلیل حساسیت پارامتر $\mathbf{d_s/h_{tw}}$، درمقابل پارامترهای $\mathbf{Q_j}$، $\mathbf{D_{50}}$ و $\boldsymbol{\theta}$ با اعمال ±۲۰ درصد تغییر

در یک ارزیابی کلی می‌توان چنین بیان نمود که اعمال ۲۰ ± درصد تغییر در پارامترهای دبی جت (Q_j)، قطر متوسط رسوبات (D_{50}) و زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی افقی نسبت به صفحهٔ افق (θ) درمجموع عمق نسبی آبشستگی (d_s/h_{tw}) را به‌ترتیب ۱۲/۳۳، ۶/۲۳ و ۳۴/۰۳ درصد تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. این بدین معناست که θ و D_{50} به‌ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در تخمین پارامتر عمق نسبی آبشستگی (d_s/h_{tw}) دارند. علت این امر را می‌توان در شکل ظاهری رابطهٔ خطی ارائه‌شده (رابطهٔ ۱۰) نیز جستجو نمود. باتوجه به این‌که در رابطهٔ (۱۰)، قطر متوسط رسوبات از توان ۰/۵ برخوردار است، این امر منجر به کاهش اثر این پارامتر درمقابل دبی جت (Q_j) و زاویهٔ برخورد جت‌ها شده‌است.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به‌منظور بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین‌دست دریچه‌های سدهای مخزنی تحت اثر جت‌های ریزشی آزاد انجام شده‌است. تفاوت عمدهٔ مشخصات این تحقیق را با تحقیقات پیشین، می‌توان در تعداد جت‌های خروجی و زاویهٔ مورداستفاده در استقرار دریچه‌ها جستجو کرد. عمدهٔ نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان به‌شرح زیر بیان نمود:

۱. تغییرات زمانی حفرهٔ ایجادشده دراثر برخورد جت‌های ریزشی آزاد به بستر پایین‌دست دریچه‌ها، نشان می‌دهد که آبشستگی ابتدا به‌صورت عمقی گسترش می‌یابد و در زمان کوتاهی به‌مقدار ثابتی می‌رسد؛ درصورتی‌که گسترش طولی و عرضی آن ادامه دارد.

۲. تغییرات دبی جت (Q_j)، بر آبشستگی پایین‌دست سدهای مخزنی در تمامی دانه‌بندی‌ها و زوایای مختلف برخورد جت‌ها، روند یکسانی را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که افزایش Q_j از ۱/۳۲ به ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه در یک دانه‌بندی و زاویهٔ ثابت (D_{50}=۶/۷۵mm و θ=۱۵°)، موجب افزایش عمق حفرهٔ آبشستگی (d_s)، افزایش گسترش طولی (L_s) و عرضی حفره (W_s)، و درنهایت افزایش حجم حفره (V_s)، به‌ترتیب به‌میزان ۷۴/۵۸، ۵۸/۳۳، ۲۷/۲۷ و ۹۵/۶۲ درصد می‌گردد. هم‌چنین محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از انتهای دریچه‌ها حدود ۵۸/۸۲ درصد دور می‌شود.

۳. افزایش قطر متوسط ذرات رسوب (D_{50})، تأثیر معکوس در مقدار آبشستگی دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش D_{50} از ۱/۷ به ۶/۷۵ میلی‌متر در یک دبی و زاویهٔ ثابت (Q_j=۵/۱۴Lit/s و θ=۱۵°)، حداکثر عمق آبشستگی حدود ۲۷/۲۷ درصد کاهش می‌یابد و محل وقوع آن حدود ۵/۵۶ درصد به دریچه‌ها نزدیک می‌شود. هم‌چنین با کاهش گسترش عرضی حفره، حجم حفرهٔ آبشستگی و نیز ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره به‌ترتیب حدود ۵۵/۶۹ و ۳۰/۹۱ درصد کم می‌شود.

۴. افزایش زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (θ)، تأثیر زیادی بر میزان حداکثر عمق آبشستگی و حجم حفرهٔ ایجادشده دارد؛ به‌طوری‌که در یک دبی و دانه‌بندی ثابت (Q_j=۵/۱۴Lit/s و D_{50}=۶/۷۵mm)، با افزایش θ از ۱۵ به ۳۰ درجه و همین‌طور از ۳۰ به ۴۵ درجه انرژی جنبشی جت آب خروجی از دریچه‌ها تحلیل می‌رود و درنهایت d_s به‌ترتیب ۱۳/۵۶ و ۲۶/۴۷ درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین حجم حفرهٔ آبشستگی در زاویهٔ ۱۵ درجه ۱۲/۹۵ درصد بیشتر از زاویهٔ ۳۰ درجه و در زاویهٔ ۳۰ درجه ۱۶/۳۱ درصد بیشتر از زاویهٔ ۴۵ درجه است.

۵. افزایش زاویهٔ برخورد جت‌ها نسبت به صفحهٔ افق، منجر به افزایش گسترش طولی و کاهش گسترش عرضی حفرهٔ آبشستگی می‌گردد؛ به‌طوری‌که در بحرانی‌ترین شرایط در این تحقیق (رسوبات ریزدانه با D_{50}=۱/۷mm و بیشترین دبی جت معادل با Q_j=۵/۱۴Lit/s)، بیشترین طول حفره برابر ۹۵ سانتی‌متر در زاویهٔ ۴۵ درجه و بیشترین عرض حفره برابر ۷۰ سانتی‌متر در زاویهٔ ۱۵ درجه می‌باشد.

٦. با انجام آنالیز ابعادی به‌روش باکینگهام (قضـیهٔ π) و ترکیب معادلات به‌دسـت‌آمده، مشـخص گردید که عمق نسبی آب‌شستگی (d_s/h_{tw}) تابعی از عدد فرود ذره ($F_g = V_j/\sqrt{g(G_s-1)D_{50}}$) و زاویـهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (θ) است.

۷. در تحقیق حاضـر رابطهٔ خطی، بهترین برازش را برروی داده‌های آزمایشـگاهی دارد که توسـط رابطهٔ زیر نشان داده شده‌است:

$$\frac{d_s}{h_{tw}} = 2.325 + 0.028F_g - 0.037\theta$$

که در رابطهٔ (۱۰)، d_s حداکثر عمق آب‌شستگی (متر)، h_{tw} عمق پایاب (متر)، F_g عدد فرود ذره ($F_g = V_j/\sqrt{g(G_s-1)D_{50}}$)، V_j سرعت جت آب خروجی از دریچه‌ها (متر بر ثانیه)، g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، G_s چگالی نسبی ($G_s = \rho_s/\rho$)، ρ_s چگالی ذرات بستر و ρ چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، D_{50} قطر متوسط ذرات رسوب بستر پایین‌دست دریچه‌ها (متر) و θ زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (درجه) می‌باشد.

۸. مقادیر d_s/h_{tw} محاسبه شده بااستفاده از رابطهٔ (۱۰)، درمقـابـل مقـادیر d_s/h_{tw} انـدازه‌گیری‌شـــده در آزمایش‌ها، به‌ترتیب دارای ضریب همبستگی (R) و ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۰/۸۹ و ۰/۲۷ می‌باشد.

۹. آنالیز حساسیت صورت‌گرفته بر رابطهٔ معرفی‌شده در این تحقیق (رابطهٔ ۱۰) نشـــان داد که با اعمال ±۲۰ درصـــد تغییر در پارامترهای Q_j، D_{50} و θ، زاویهٔ برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحهٔ افق (θ) و قطر متوسـط رسـوبات بسـتر پایین‌دسـت دریچه‌ها (D_{50}) به‌ترتیب بیشـترین و کمترین تأثیر را در تخمین پارامتر عمق نسبی آب‌شستگی (d_s/h_{tw}) دارند؛ به‌طوری‌که اعمال ±۲۰ درصـــد تغییر در Q_j، D_{50} و θ، درمجموع d_s/h_{tw} را به‌ترتیب ۱۲/۳۳، ٦/۲۳ و ۳٤/۰۳ درصد تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مراجع

۱. مومنی و صالیان، رضا، موسوی جهرمی، حبیب، شفاعی بجستان، محمود، «آب‌شستگی ناشی از جت‌های مستطیلی در پایین‌دست پرتابه‌های جامی شکل»، مجلهٔ علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد پانزدهم، ش. ۲، صص ۲۰۳–۲۱٦، (۱۳۸۷).

۲. آذرا، اردشیر، «اثر دانه‌بندی مصالح بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد»، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شهرکرد، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد، (۱۳۸٦).

3. Pagliara, S., Hager, W.H. and Minor, H.-E., "Hydraulics of Plane Plunge Pool Scour", *Journal of Hydraulic Engineering*,Vol. 132, Pp. 450-461, (2006).

4. Pagliara, S., Palermo, M. and Roy, D., "Stilling Basin Erosion due to Vertical Crossing Jets", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, Pp. 290-297, (2012).

5. Xie, C. and Lim, S.-Y., "Effects of Jet Flipping on Local Scour Downstream of a Sluice Gate", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 141, Pp. 040140881-040140823, (2014).

6. Termini, D., "Bed Scouring Downstream of Hydraulic Structures under Steady Flow Conditions: Experimental Analysis of Space and Time Scales and Implications for Mathematical Modeling", Catena,Vol. 84, Pp. 125-135, (2011).

7. Breusers, H. and Raudkivi, A., "Scouring, Hydraulic Structures Design Manual", IAHR, AA Balkema, Rotterdam,Vol. 143, (1991).

8. Mason, P.J. and Arumugam, K., "Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, Pp. 220-235, (1985).

۹. سعیدی نژاد، محمدرضا ،«تحلیل آب‌شستگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی مستطیل‌شکل»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸٤).

۱۰. رنجبر، حمیدرضا ، «بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی در مصالح غیریکنواخت»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸٦).

11. Farhoudi, J. and Smith, K.V., "Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump", *Journal of hydraulic research*, Vol. 23, Pp. 343-358, (1985).

۱۲. اکبری ، غلامحسین، کاویانپور اصفهانی، محمدرضا، و سلطانی سامانی، احسان، « بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی پایین دست پرتاب‌کنندهٔ جامی‌شکل»، مجله مهندسی آب، دوره ۷ ، شماره ۲۰ ، صص ٥۱-٦٥، (۱۳۹۰).

۱۳. کلانتری، میترا، بازرگان، جلال، «تخمین عمق آب‌شستگی پایین‌دست پرتابه‌های جامی‌شکل در حوضچه‌های استغراق»، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه ارومیه، (۱۳۹۳).